

基于BP神经网络和主元分析法的数码相机光谱 重构算法

王勇 陈梅

杭州电子科技大学数字媒体与艺术设计学院, 浙江 杭州 310018

摘要 从数码相机的RGB信号重构物体表面的光谱反射率是光谱颜色管理研究中的重要课题之一。提出了一种基于误差反向传播前馈神经网络(BP)和主元分析法(PCA)实现色卡的表面光谱反射率重构的新算法。通过对三种色卡进行光谱重构实验研究了BP神经网络的最优结构和主元数的最佳选择,验证了算法的精度。实验结果表明,采用适当的BP神经网络和主元分析相结合的新算法能够精确重构同类色卡的表面光谱反射率。

关键词 视觉光学; 光谱重构; 主元分析法; 神经网络; 数码相机

中图分类号 O433.1 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.123301

Spectral Reconstruction Algorithm of Digital Camera Based on BP Neural Network and Principal Component Analysis

Wang Yong Chen Mei

School of Digital Media and Art Design, Hangzhou Dianzi University, Zhejiang, Hangzhou 310018, China

Abstract Reconstructing the spectral reflectance of the object surface from RGB signals of digital camera is one of the important studies of spectral color management. A new algorithm based on back propagation (BP) neural network and principal component analysis (PCA) is proposed to realize the spectral reflectance reconstruction of color atlas. The optimal structure of BP neural network and the number of principal components are studied in the spectral reflectance reconstruction experiments of three color atlases and the accuracy of the algorithm is also testified. The experimental results show that the new algorithm of appropriate BP neural network combined with PCA is satisfied to accurately reconstruct the spectral reflectance of the same kind of color atlas.

Key words visual optics; spectral reconstruction; principal component analysis; neural network; digital camera

OCIS codes 330.1690; 330.1710; 330.6180

1 引言

数码相机作为一种常用的数字图像输入设备,在机器视觉、生物识别、医疗检测等行业都有着广泛的应用^[1-3]。数码相机的光谱颜色特征化^[4-6],作为光谱颜色管理的重要课题得到了广泛研究。杨萍等^[4]采用人工神经网络和奇异值分解相结合方法实现了给定照明和观测条件下的四通道数码相机拍摄Munsell色卡的光谱反射率重构。陈奕艺等^[5]采用主元分析法和多项式回归法相结合证实了采用双光源照明能提高数码相机的光谱重构精度。张显斗等^[6]采用色卡分组和扩展主元分析法实现了色卡的三刺激值到表面反射率的高精度重构。反向传播(BP)神经网络与主元分析法相结合的算法能够实现扫描仪扫描图像的高精度光谱重构^[7-8],但应用于数码相机的光谱重构尚未见报道。本文将采用BP神经网络和主元分析法相结合的算法实现数码相机的光谱重构,并分别采用3种色卡验证了该算法的重构精度。

2 光谱重构算法

首先记训练样本集中色块表面光谱反射率为 $R_{N \times M}$, M 为采样波长数, N 为色块数。主元分析前对光

收稿日期: 2014-05-19; 收到修改稿日期: 2014-06-26; 网络出版日期: 2014-10-31

作者简介: 王勇(1976—),男,博士,高级工程师,主要从事颜色科学、图像技术和光电检测技术等方面的研究。

E-mail: wangyong_zju@163.com

谱进行归一化处理,即

$$nR_{N \times M} = (R_{N \times M} - \bar{R})/R_{\text{std}}, \quad (1)$$

式中 $nR_{N \times M}$ 为归一化后的光谱, \bar{R} 和 R_{std} 分别为光谱均值和标准偏差。

记特征向量矩阵 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_M\}$, 则排序靠前的 $K (K < M)$ 个特征向量被称做主元向量, 构成主元矩阵 $E_{K \times M}$, 则光谱反射率矩阵可表示为

$$nR_{N \times M} = S_{N \times K} \cdot E_{K \times M}, \quad (2)$$

式中 $S_{N \times K}$ 为主元系数矩阵。假设存在 BP 神经网络 $V_{\text{net}_{3-n-k}}$ 实现数码相机获取 $V_{\text{RGB}_{N \times 3}}$ 值与主元系数矩阵 $S_{N \times K}$ 的非线性映射关系, 即存在

$$S_{N \times K} = V_{\text{net}_{3-n-k}}(V_{\text{RGB}_{N \times 3}}). \quad (3)$$

通过训练集的训练得到主元矩阵 $E_{K \times M}$ 、光谱均值 \bar{R} 、标准偏差 R_{std} 以及神经网络 $V_{\text{net}_{3-n-k}}$, 则对于检验集样本 $V_{\text{RGB}_{N_2 \times 3}}$ (N_2 为检验集样本数), 分别通过(3)式、(2)式和(1)式的逆运算可重构检验集样本光谱 $R_{N_2 \times M}$ 。

常用的光谱重构精度的评价方法包括光谱均方根误差^[7](SRMSE)评价、色差评价、同色异谱特性评价^[6]。色差评价采用 D50 光源、CIE1931 标准色度观察者和 CIEDE2000 色差公式, 记作 ΔE_{00} 。本研究采用标准 A 光源和 D65 光源下所有样品色块的同色异谱差均值评价光谱重构的同色异谱特性, 同色异谱差计算公式参考文献[5]。

3 实 验

3.1 实验器材及设置

数码相机为佳能 EOS 60D, 照明为晴朗下午北窗光, 实验地点为室内。照相机光圈为 $f/7.1$, 曝光时间 $1/5$ s, 无曝光补偿, 焦距 $f=62$ mm, 无闪光, 拍照前采用 X-Rite 的白色色卡对照相机进行白点校正。色卡选择 X-Rite 的 Digital ColorChecker SG(96 个色块, 去除四周的中性色块), 记作 SG, 两张湖南印刷厂印制的亚光色卡 C100M100Y20K20(144 个色块)和 C100M100Y20K40(144 个色块), 分别记作 SK1 和 SK2。其中 SK1 色卡如图 1(a)所示, C100 表示 C 油墨取 0、5、10、20、30、40、50、60、70、80、90、100, M100 含义与 C100 相同, Y20 表示 Y 油墨取 20, K20 含义与 Y20 相同。SK2 色卡如图 1(b)所示, 与 SK1 色卡不同的是 K 油墨的取值为 40。

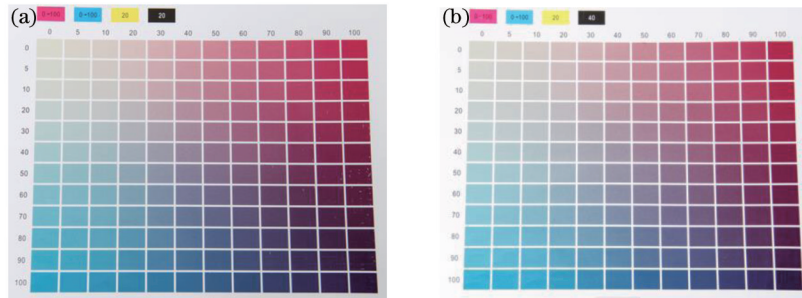


图 1 (a) SK1 色卡; (b) SK2 色卡

Fig.1 (a) SK1 color atlas; (b) SK2 color atlas

拍照时, 被拍摄对象朝向北窗放置在放置架上, 相机固定在三角架上, 正对被拍摄对象, 手动拍照, 装置布置如图 2 所示。所拍电子图像导入计算机后, 图像红绿蓝(RGB)值采用读图软件读取, 读取的范围是色卡色块中心 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 区域。色卡色块的光谱反射率用 X-Rite 的 i1 Pro 测量得到, 光谱反射率采样波长为 $380 \sim 730 \text{ nm}$, 间隔为 10 nm , 每个色块的光谱反射率向量均包含 36 个波长采样值。

3.2 光谱重构结果与分析

首先, 用 X-Rite 的 Eye-One Pro 对 SG 色卡的所有色块进行了 3 次测试, 记作 $M_i (i=1, 2, 3)$, 分析 3 次测试结果的一致性, 评价测试仪器的测试重复精度。分别用光谱均方根误差 SRMSE、同色异谱差 E_M 和色差 ΔE_{00} 计算三次测试两两之间的差异, 计算结果列于表 1, 其中 avg, min, max 分别为平均值, 最小值和最大值。

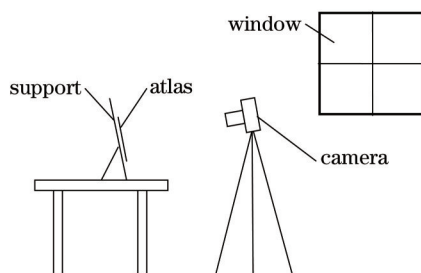


图2 设置示意图

Fig.2 Setup diagram

表1 Eye-One Pro 测试精度

Table 1 Measure precision of the Eye-One Pro

	SRMSE /10 ⁻²			E_M			ΔE_{00}		
	avg	min	max	avg	min	max	avg	min	max
M_1 & M_2	0.360	0.013	7.600	0.038	0.001	0.369	0.147	0.003	1.189
M_1 & M_3	0.450	0.014	8.680	0.041	0.002	0.385	0.202	0.027	1.940
M_2 & M_3	0.310	0.013	2.760	0.032	0.002	0.177	0.148	0.010	1.885

从表1可知,仪器在短时间内的测试一致性较好,后面SG色卡实验中取两次测试结果接近的 M_2 & M_3 的均值作为标准光谱反射率值。对SK1和SK2色卡的实验也进行类似的处理。

然后,分别对SG、SK1和SK2色卡的测试光谱反射率值进行主元分析,选取不同主元数分别计算主元分析重构光谱与原光谱的SRMSE误差值,结果列于表2。可见,SK1和SK2色卡中各色块的光谱相似度高,选择3个主元已经足够,SG色卡中色块的光谱差异较大,应选择6或9个主元。将SK1和SK2色卡按照采样顺序分为奇数组和偶数组,奇数组作为训练样本,偶数组作为检验样本,主元分析法(PCA)主元数选择3,BP神经网络训练目标设为0.0001,训练步数设定为200,隐层节点数选择从3到33进行光谱重构分析,训练集和检验集的光谱重构SRMSE均值如图3所示。

表2 PCA重构光谱与原始光谱的SRMSE($\times 10^{-2}$)均值Table 2 Average SRMSE ($\times 10^{-2}$) between original and reconstructed spectrum by PCA

Principal component number	SG		SK1		SK2	
	avg	max	avg	max	avg	max
3	2.98	7.74	0.36	1.39	0.23	0.72
6	1.16	3.42	0.06	0.19	0.03	0.11
9	0.43	1.10	0.02	0.05	0.01	0.03

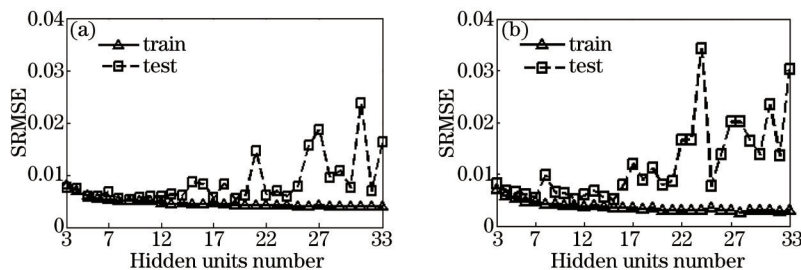


图3 SK1和SK2色卡用不同隐层单元数BP网络光谱重构的SRMSE均值。(a) SK1; (b) SK2

Fig.3 Average SRMSE of SK1 and SK2 spectra resconstructed by BP net using defferent hidden units numbers.

(a) SK1; (b) SK2

依据SRMSE值,最佳网络结构下SK2检验集的最佳和最差的5个重构光谱与其原光谱示于图4。由图4可知,随着隐层节点数增加,训练集的误差逐渐减小,而检验集的误差则先减小,然后出现较大的波动,表现出过拟合现象, ΔE_{00} 和 E_M 评价指标也有类似的表现,因此最优网络结构为3-6-3。

但是相似的光谱差异引起的色差可能会有较大的差异,表4列出SK2中2个具有相似重构光谱和较大

色差的色块分别在 D65 光源、标准 A 光源下的三刺激值以及色差,图 5 给出这 2 个色块的重构光谱和原光谱。

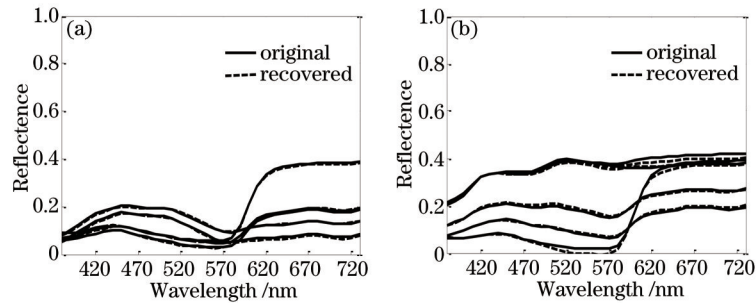


图 4 依据 SRMSE 值,SK2 色卡检验集中 5 个最佳和最差的重构光谱与对应的原光谱。(a) 最佳;(b) 最差

Fig.4 The best and the worst five spectra reconstructed and their original in SK2 testing set according to SRMSE values.

(a) The best; (b) the worst

表 4 SK2 色卡检验集中 2 个重构光谱与原光谱相似而色差明显的色块

Table 4 Two patches in SK2 testing set with similar spectrum and big color difference

Patch	Illum.	Original			Recovered			ΔE_{00}	SRMSE / 10^{-2}
		X	Y	Z	X	Y	Z		
1	D65	8.153	7.378	5.020	8.215	7.540	5.000	28.508	0.20
	A	7.879	7.946	15.545	7.918	8.148	15.433	1.702	
2	D65	3.384	3.098	3.411	3.509	3.093	3.363	36.730	0.26
	A	3.844	3.587	10.710	3.882	3.537	10.572	1.234	

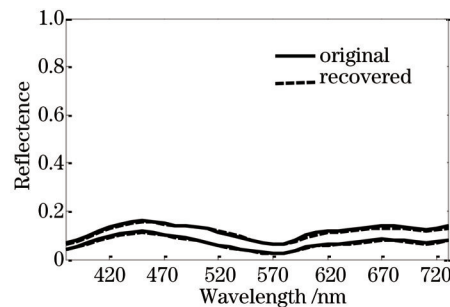


图 5 SK2 色卡中 2 个重构光谱与原光谱相似而色差明显色块的光谱

Fig.5 Spectra of the two patches in SK2 testing set with similar spectrum and big color difference

在最优网络结构下,SK1 和 SK2 色卡的光谱重构精度如表 5 所示。

表 5 SK1 和 SK2 色卡用 PCA 结合 BP 网络重构光谱的性能

Table 5 Performance of spectra reconstructed by PCA and BP net of SK1 and SK2

Atlas		SRMSE / 10^{-2}		E_M		ΔE_{00}	
		avg	max	avg	max	avg	max
SK1	train	0.533	1.475	0.434	4.513	1.214	7.212
	test	0.593	1.554	0.709	3.722	1.404	24.653
SK2	train	0.470	1.047	0.531	3.275	1.202	10.221
	test	0.610	2.288	0.827	5.057	1.581	11.485

因 SG 色卡色块数量较少,按照采样顺序将前 1 至 5 个色块作为训练样本,第 6 个色块作为检验样本,以此类推得到 80 个色块为训练集,16 个色块为检验集,PCA 主元数选择分别选择 6 和 9,BP 神经网络训练目标设为 0.0001,训练步数设定为 200,隐层节点数选择从 5 到 35,进行光谱重构分析,训练集和检验集的光谱重构 SRMSE 均值如图 6 所示。由图 6 可知对于检验集,当隐层节点数超过 25 时,主元数为 6 的 SRMSE 均值波动要大于主元数为 9 的波动,而在 25 以内,则波动很小。对于训练集,则 SRMSE 均值随着隐层节点数的增加逐渐减小,当隐层节点数超过 25 后下降的幅度趋于平缓。综合考虑训练集和检验集确定最优网络结构分别为 3-25-6 和 3-25-9。

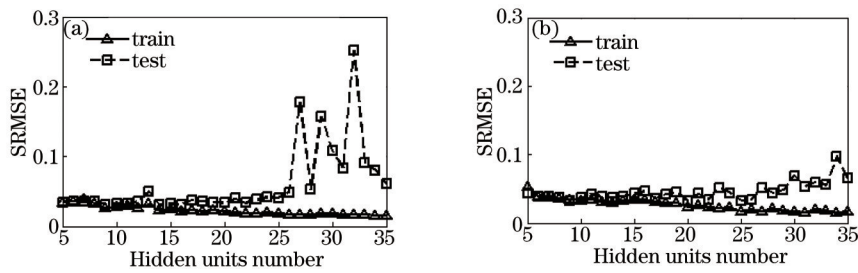


图6 SG色卡用不同隐层单元数的(a) 3-n-6和(b) 3-n-9重构光谱的SRMSE均值

Fig.6 Average SRMSE of SG spectra reconstructed by (a) 3-n-6 and (b) 3-n-9 BP net using different hidden units numbers

在最优网络结构下,SG色卡的光谱重构精度如表6所示,可见主元数选择6或9,光谱重构精度相差并不明显,而3-25-6的网络结构更加简单,因此对于SG色卡,最优网络结构为3-25-6。对于SG色卡的检验集,光谱重构的精度较差,原因可能是因为训练集的样本的代表性不够,导致BP神经网络训练的误差较大。

表6 SG色卡用PCA结合BP网络重构光谱的性能

Table 6 Performance of spectra reconstructed by PCA and BP net of SG

BP net		SRMSE /10 ⁻²		E_M		ΔE_{00}	
		avg	max	avg	max	avg	max
3-25-6	train	1.799	3.786	1.043	5.537	2.097	12.819
	test	4.062	8.123	3.843	13.049	3.402	11.852
3-25-9	train	1.658	4.199	1.159	5.563	2.417	18.740
	test	3.266	7.011	3.111	10.801	6.560	35.622

将本文的光谱重构结果与参考文献的结果进行比较,结果示于表7。可见本文的重构算法获得了较好的光谱重构精度。

表7 光谱重构算法性能比较

Table 7 Performance comparison of different spectral reconstruction algorithms

Algorithms	SRMSE /10 ⁻²		E_M		ΔE_{00}	
	avg	max	avg	max	avg	max
PCA & BP net	0.593	1.554	0.709	3.722	1.404	24.653
Ref.[4]	2.340	/	/	/	/	/
Ref.[5]	2.120	10.310	/	/	1.774	6.228
Ref.[6]	1.120	10.140	/	/	/	/

4 结 论

提出采用BP神经网络和主元分析法相结合的方法实现从数码相机的RGB信号重构被拍摄对象的光谱反射率信息。实验结果表明该方法能够取得了满意的光谱重构精度,BP神经网络结合主元分析法进行数码相机的光谱重构精度与训练集的选择关系密切,如果训练集样本数充分,能够代表检验集的样本特征,则选择合适的BP神经网络结构可以获得非常高的光谱重构精度,色块的光谱一致性越好,则网络结构越简单。如果训练集内样本的差异较大,且训练集样本不具有充分的代表性,则难以获得理想的光谱重构精度。选择包含过多隐层单元数的网络结构会导致过拟合现象,表现为检验集光谱重构精度存在较大的波动。BP神经网络的最佳隐层单元数是能够获得稳定的检验集光谱重构精度的最大隐层单元数。

参 考 文 献

- 1 Wang Fangyong, Wang Keru, Li Shaokun, *et al.*. Estimation of chlorophyll and nitrogen contents in cotton leaves using digital camera and imaging spectrometer[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(11): 1981-1989.
王方永, 王克如, 李少昆, 等. 利用数码相机和成像光谱仪估测棉花叶片叶绿素和氮素含量[J]. *作物学报*, 2010, 36(11): 1981-1989.
- 2 Wang Jian, Li Shaofa. Study on computer vision grading based on apple coloration area[J]. *Computer Engineering and*

Design, 2008, 29(11): 3813-3814, 3817.

王 建, 黎绍发. 基于苹果着色面积的计算机视觉分级技术研究[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(11): 3813-3814, 3817.

3 Zhao Shimin, Wang Jun. De-/re- mineralization in deciduous teeth assessed by color value analysis of digital photographs: an *in vivo* study[J]. Shanghai Journal of Stomatology, 2011, 20(5): 527-530.

赵是民, 汪 俊. 牙色度分析在原位乳牙脱矿与再矿化检测中的应用[J]. 上海口腔医学, 2011, 20(5): 527-530.

4 Yang Ping, Liao Ningfang, Song Hong. Study of approaches to spectral reflectance reconstruction based on digital camera[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(5): 1176-1180.

杨 萍, 廖宁放, 宋 宏. 基于彩色数字相机的光谱反射率重建方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(5): 1176-1180.

5 Chen Yiyi, Xu Haisong, Zhang Xiandou, *et al.*. Study of spectral reconstruction based on digital camera[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(5): 1416-1419.

陈奕艺, 徐海松, 张显斗, 等. 基于数码相机的光谱重构研究[J]. 光学学报, 2009, 29(5): 1416-1419.

6 X D Zhang, H S Xu. Reconstructing spectral reflectance by dividing spectral space and extending the principal components in principal component analysis[J]. J Opt Soc Am A, 2008, 25(2): 371-378.

7 Y Wang, H S Xu. Spectral characterization of scanner based on PCA and BP ANN[J]. Chinese Optics Letters, 2005, 3(12): 725-728.

8 Y Wang, H S Xu. Spectral characterization of a flat panel color scanner using PCA method[C]. SPIE, 2006, 6033: 60330J.